

University of Groningen

Het oor. Fysische werking, gehoorverlies en gehoorrevalidatie

van Dijk, Pim; de Kleine, Emile; Maat, Albertus

Published in:
Nederlands Tijdschrift voor Natuurkunde

IMPORTANT NOTE: You are advised to consult the publisher's version (publisher's PDF) if you wish to cite from it. Please check the document version below.

Document Version
Final author's version (accepted by publisher, after peer review)

Publication date:
2017

[Link to publication in University of Groningen/UMCG research database](#)

Citation for published version (APA):
van Dijk, P., de Kleine, E., & Maat, A. (2017). Het oor. Fysische werking, gehoorverlies en gehoorrevalidatie. *Nederlands Tijdschrift voor Natuurkunde*, Juli.

Copyright

Other than for strictly personal use, it is not permitted to download or to forward/distribute the text or part of it without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), unless the work is under an open content license (like Creative Commons).

The publication may also be distributed here under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license. More information can be found on the University of Groningen website: <https://www.rug.nl/library/open-access/self-archiving-pure/taverne-amendment>.

Take-down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Downloaded from the University of Groningen/UMCG research database (Pure): <http://www.rug.nl/research/portal>. For technical reasons the number of authors shown on this cover page is limited to 10 maximum.

Het oor

Fysische werking, gehoorverlies en gehoorrevalidatie

Zonder oren kunnen we geen muziek waarnemen. In dit artikel wordt uitgelegd hoe het oor werkt, wat de oorzaken zijn van gehoorverlies en wat daaraan te doen is. Pim van Dijk, Emile de Kleine en Bert Maat

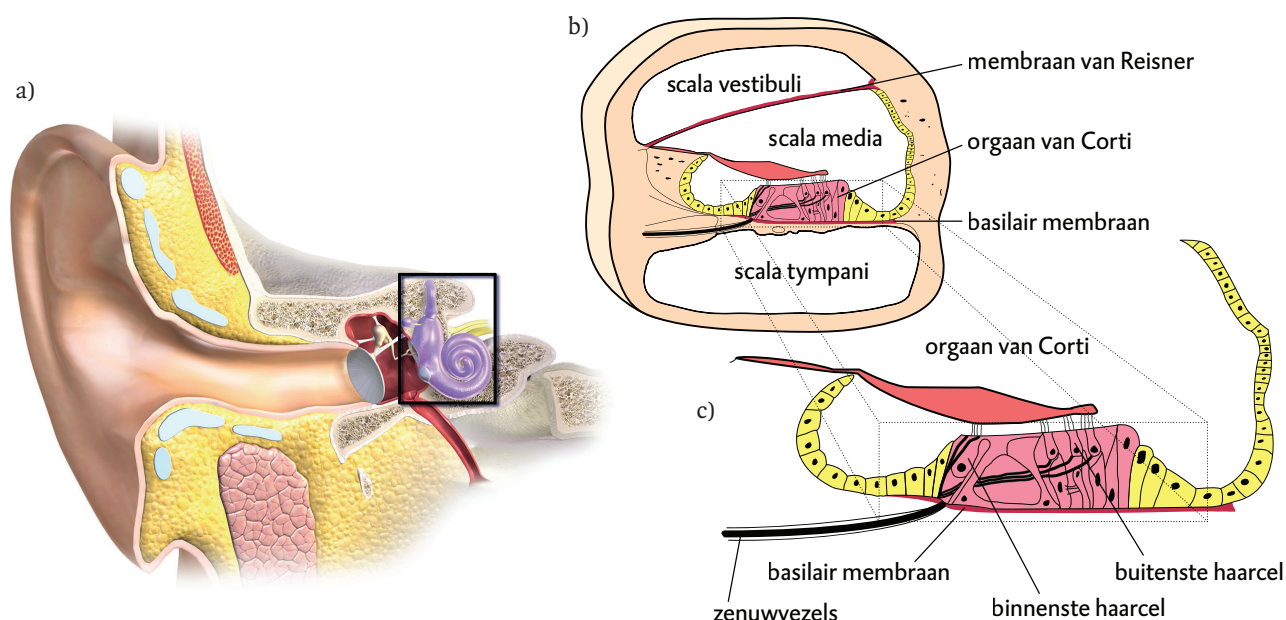
In het oor worden geluidstrillingen omgezet naar neurale signalen. Dit gebeurt met een verbluffend bereik van frequenties en geluidsniveaus, en met hoge resolutie. Het dynamisch bereik van het menselijk oor is ongeveer 120 dB, overeenkomend met een intensiteitsverschil van twaalf ordes van grootte tussen het zachtste geluid dat nog juist kan worden waargenomen en het luidste nog net te tolereren geluid. Bij de gehoordrempel detecteren de haarcellen in het oor een

trillingsamplitude van ongeveer 1 nm. Het frequentiebereik van het menselijk oor is 20-20.000 Hz, bijna tien octaven op een muzikale schaal. Twee tonen met verschillende frequenties f_1 en f_2 kunnen juist onderscheiden worden als de ratio $f_2/f_1 = 1,002$ (bij 1000 Hz) aanmerkelijk kleiner is dan het frequentieverschil van twee naast elkaar gelegen toetsen op een piano ($f_2/f_1 = 1,06$). Bovendien vangt het oor niet alleen geluid op, maar zendt ook geluid uit. Welke structuren en

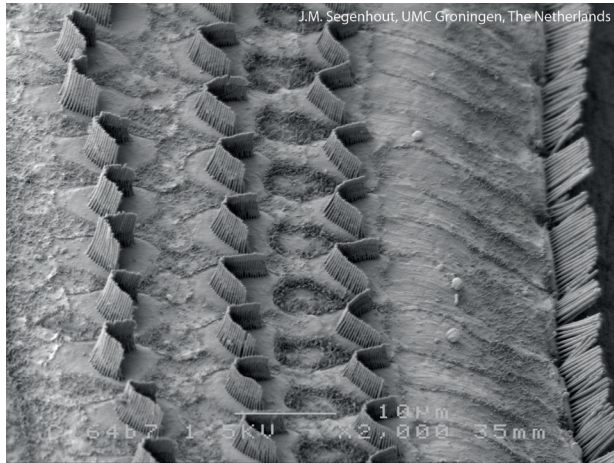
mechanismen spelen hierbij een rol?

Anatomie van het oor

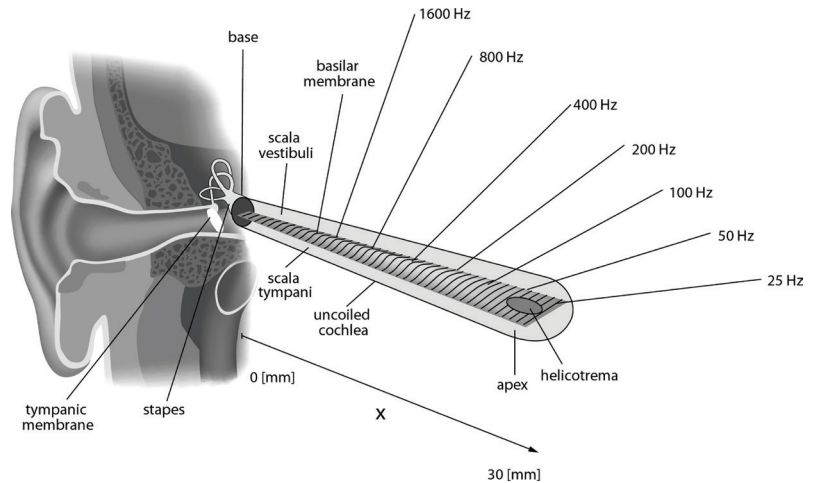
Het gehoororgaan bestaat uit drie onderdelen: het buitenoor, het middenoor en het binnenoor (figuur 1). Trillingen in de lucht worden opgevangen door de oorschelp en via het trommelvlies en de middenoorbeentjes (hamer, aambeeld en stijgbeugel) doorgegeven aan het binnenoor. Het middenoor functioneert als impedantieomvormer; van lucht in de gehoor-



Figuur 1 Anatomie van het oor. a) Geluid wordt opgevangen door het trommelvlies aan het eind van de gehoorgang. Via drie middenoorbeentjes wordt geluidstrilling doorgegeven aan het slakkenhuis/binnenoor. Het slakkenhuis ligt diep in de schedel in het rotsbeen, het hardste bot in het menselijk lichaam. b) Het slakkenhuis bestaat uit drie compartimenten die gescheiden worden door het basilair membraan en het membraan van Reissner. Op het basilair membraan bevindt zich het orgaan van Corti. c) In het orgaan van Corti bevinden zich de sensorische haarcellen die geluid omzetten naar elektrische activiteit. De binnenste en buitenste haarcellen verschillen van functie. De binnenste haarcellen worden geïnnerveerd door circa 95% van de zenuwvezels die geluidsprikkels doorgeven aan de hersenen. Slechts 5% van de zenuwvezels maakt contact met de buitenste haarcellen. Verondersteld wordt dat de buitenste haarcellen mechanisch geluid kunnen versterken. Credits: 1a: Blausen.com staff (2014). "Medical gallery of Blausen Medical 2014. 1b-c: CC BY-SA 3.0, Oarih (aangepast).



Figuur 2 Blick op het orgaan van Corti met behulp van een elektronenmicroscop. De stereocilia (de haartjes) op de haarcellen zijn zichtbaar. De bundels van de drie rijen buitenste haarcellen zijn V/W-vormig. De binnenste haarcellen (rechts) vormen gezamenlijk een rij van stereocilia.



Figuur 3 Bij eenvoudige mechanische modellen van de cochlea worden twee compartimenten beschouwd die gescheiden zijn door het basilair membraan. Door de eigenschappen van het membraan te variëren in de lengterichting kan de tonotopie van het binnenoor worden gemodelleerd. Credits: CC BY 2.5, Kern A, Heid C, Steeb W-H, Stoop N, Stoop R

gang naar vloeistof in het binnenoor. Geluid wordt opgevangen op het relatief grote oppervlak van het trommelvlies en aan het binnenoor doorgegeven via het relatief kleine oppervlak van de stijgbeugel in het ovale venster van het binnenoor. In combinatie met de hefboomwerking van hamer en aambeeld wordt zo een verhoging van de geluidsdruk van circa vijftig keer bereikt (ongeveer 30 dB), waardoor geluid zonder noemenswaardig energieverlies de vloeistof van het binnenoor bereikt.

Het binnenoor wordt vanwege zijn vorm ook het slakkenhuis of de cochlea genoemd. De spiraalvormige buis bestaat uit drie parallelle kanalen die van elkaar gescheiden worden door twee membranen, het membraan van Reissner en het basilair membraan (figuur 1). Op het basilair membraan bevindt zich het orgaan van Corti. Dit orgaan van Corti spiraalt door de hele cochlea en bevat de sensorische haarcellen (figuur 2). De haarcellen zijn geordend als een rij binnenste haarcellen in de binnenbocht van de spiraal en drie rijen buitenste haarcellen in de buitenbocht. Op de haarcellen bevinden zich bundels met stereocilia (de haartjes) die enkele micrometers hoog zijn. De stereocilia zijn afgedekt met het zogeheten tectoriaal membraan. Een geluid dat via het ovale venster het binnenoor bereikt, zal zorgen voor een geluidsgolf die zich vrijwel instantaan door de vloeistof verspreidt en het basilair membraan in trilling brengt. Hierdoor ontstaat

een schuifbeweging van het tectoriaal membraan ten opzichte van de haarcellen. Verbuiging van de stereocilia is de primaire stimulus voor de haarcellen; ionkanalen in de stereocilia openen zich en laten ionen de haarcel instromen. Hiermee zijn geluidstrillingen omgezet in een elektrisch signaal. Dit resulteert in actiepotentialen in de zenuwvezels die contact maken met de haarcellen.

Tonotopie

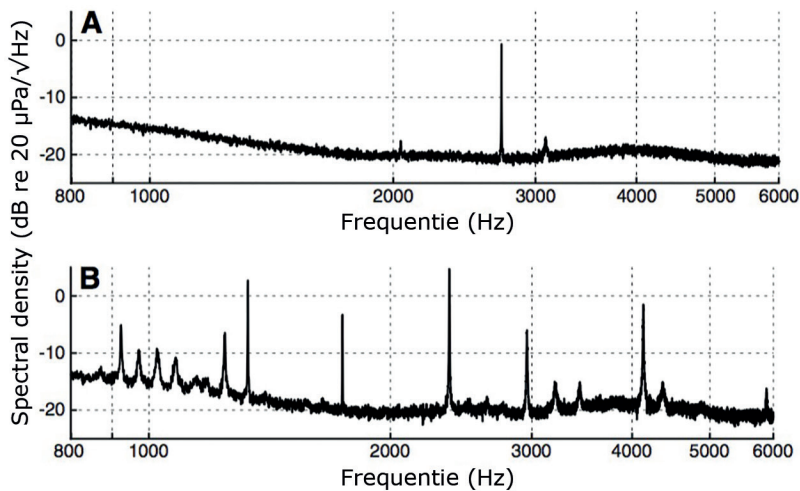
Een van de belangrijkste functionele karakteristieken van het binnenoor is de tonotopie (figuur 3). Nobelprijswinnaar Georg von Békésy liet zien dat in reactie op een zuivere toon het basilair membraan een lopende golf vertoont die zijn maximale amplitude bereikt op een specifieke positie langs het basilair membraan. Hoge frequenties leiden tot excitatie 'vooraan' (basaal) in het slakkenhuis, dicht bij het middenoor. Voor lage frequenties piekt de lopende golf juist achteraan in het slakkenhuis (apicaal). Iedere plek op het basilair membraan daar tussenin is op een specifieke frequentie afgestemd. Deze frequentieselectiviteit is gebaseerd op de mechanische eigenschappen van het basilair membraan. Aan de basale zijde is het membraan smal en stijf, aan de apicale zijde is het breed en slap.

De mechanica van het basilair membraan kan in eerste benadering worden gemodelleerd door een buis met een lengte van 35 mm te beschouwen die in twee compartimenten wordt ge-

scheiden door een flexibel membraan (figuur 3). De tonotopie ontstaat door het membraan aan het begin stijf te maken en aan het einde slap. Er kan een – via de vloeistof gekoppelde – golfvergelijking worden afgeleid door de mechanica van de vloeistoffen en het membraan te beschouwen:

$$\frac{\delta^2}{\delta x^2} \left(m \frac{\delta q(x, t)}{\delta t} + d(x) q(x, t) + s(x) \int q(x, t) dt \right) = C \frac{\delta q(x, t)}{\delta t}$$

waarbij q de flux van de vloeistof langs het basilair membraan is en m , s en d respectievelijk de massa, stijfheid en demping van het basilair membraan zijn, C een constante en x de plaats op het basilair membraan, van basaal naar apicaal. De demping en stijfheid zijn plaatsafhankelijk (afnemend van basaal naar apicaal). De plaatselijke beweging van het basilair membraan kan worden afgeleid van de flux over het membraan. Verandering van de flux kan in dit model alleen door beweging van het membraan worden veroorzaakt [1]. Deze vergelijking heeft een lopende golf op het basilair membraan als oplossing, waarbij de golfomhullende piekt op een positie die afhangt van de frequentie. Op deze manier zorgt de mechanica van het basilair membraan in het slakkenhuis voor een Fourierdecompositie van het inkomende geluid. De relatie van toonhoogte naar plaats kan als volgt worden beschreven:



Figuur 4 Spectrum van spontane otoakoestische emissies in twee proefpersonen. De pieken corresponderen met tonen die door het oor worden uitgezonden. Ieder oor heeft een uniek patroon van pieken, dat gedurende vele jaren stabiel is.

$$f = 165,4 (10^{0,06x} - 0,88),$$

$$x = 0 - 0,035,$$

waarbij f de frequentie van de toon is en x de plaats op het basilair membraan vanaf het ovale venster [2].

Actieve mechanica

Een opmerkelijk fenomeen is dat het oor ook in staat is om zelf geluid uit te zenden, zonder dat een geluid wordt aangeboden. Deze spontane otoakoestische emissies kunnen worden gemeten met behulp van een ge-

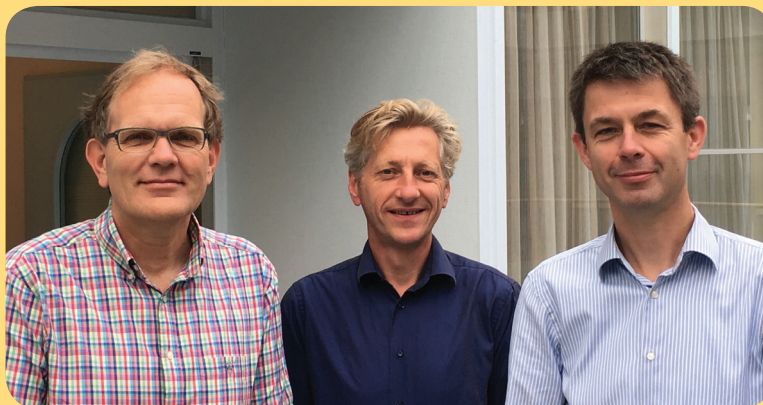
voelige microfoon in de gehoorgang (figuur 4), en zijn detecteerbaar in ruim 70% van normaalhorende oren (oto is Grieks voor oor). De aanwezigheid van deze emissies wordt beschouwd als belangrijke aanwijzing dat het oor niet slechts een passieve geluidsdetector is, maar ook actief geluiden versterkt.

De aanwezigheid van otoakoestische emissies werd al in 1948 voorspeld door de Engelse fysicus Gold [3]. Hij verwonderde zich over de grote nauwkeurigheid waarmee twee tonen

(met een klein verschil in frequentie) onderscheiden kunnen worden. Aan gezien het slakkenhuis gevuld is met vloeistof, dempt deze vloeistof de trillingen van het basilair membraan. Gold betoogde dat de amplitude van het basilair membraan ter plaatse van de resonantiefrequentie – en daarmee de frequentieselectiviteit van het oor – vergroot kon worden door actieve terugkoppeling in het detectieproces. Hij realiseerde zich dat een dergelijke terugkoppeling ook kan leiden tot instabiliteit en dus tot de spontane generatie van geluid. In 1978 beschreef de Engelse fysicus Kemp voor het eerst metingen van otoakoestische emissies (in de eerder genoemde gekoppelde golfvergelijking kunnen deze spontane oscillaties worden gegenereerd door op enkele plaatsen het basilair membraan een negatieve demping te geven waardoor de beweging wordt versterkt).

Toch is tot op heden niet bekend hoe actieve terugkoppeling in het binnenoor precies bijdraagt aan de frequentieselectiviteit. Wel is bekend welke componenten waarschijnlijk verantwoordelijk zijn voor de actieve terugkoppeling. De buitenste haarcellen blijken in staat te zijn om van lengte te veranderen. Zij doen dit met audiofrequenties. Deze mechanische reacties van buitenste haarcellen zouden heel goed een rol kunnen spelen bij actieve terugkoppeling in het orgaan van Corti.

Actieve mechanische modellen van de cochlea laten zien dat individuele pieken in het emissiespectrum mogelijk corresponderen met staande golven op het basilair membraan, zoals recente mechanische modellen laten zien (zie simulatie in supplemental material bij [4]). Dergelijke staande golven kunnen niet voor alle frequenties optreden, wat correspondeert met de experimentele bevinding dat naburige emissiepieken in een spectrum het meest waarschijnlijk op een afstandsverhouding van ongeveer 1,06 staan. Dit komt opvallend genoeg overeen met het kleinste interval in westerse muziek. Actieve geluidsversterking is niet beperkt tot mensen of zoogdieren. Emissies zijn ook gemeten in vogels, reptielen en amfibieën. Dit toont dat de onderliggende mechanismen een fundamenteel karakter hebben, die worden gedeeld door binnenoren met diverse structuren.



Links: Pim van Dijk (1960) studeerde natuurkunde in Groningen, waar hij ook promoveerde. Zijn voornaamste onderzoeksinteresses zijn de biofysica van het binnenoor en de neuroscience van tinnitus. Hij is klinisch fysicus-audioloog aanvankelijk in Maastricht en sinds 2004 in Groningen. Daar is hij ook hoogleraar audiologie.

Midden: Bert Maat (1963) heeft wiskunde gestudeerd aan de Rijksuniversiteit Groningen. Hij doet onderzoek naar midden- en binnenroormodellen. De opleiding tot klinisch fysicus heeft hij in het AMC in Amsterdam gevolgd.

Rechts: Emile de Kleine (1971) studeerde technische natuurkunde aan de Universiteit Twente. Hij deed zijn promotie-onderzoek en vervolgens de opleiding tot klinisch fysicus in het UMC Groningen. Hij werkt daar sinds 2004 als klinisch fysicus-audioloog.

p.van.dijk@umcg.nl

Gehoorscreening en gehoorverlies

Otoakoestische emissies worden in Nederland sinds 2002 gebruikt als gehoorscreening bij baby's. In de eerste weken na de geboorte wordt een registratie van otoakoestische emissies verricht, meestal thuis. Als emissies detecteerbaar zijn, wordt geconcludeerd dat het gehoor normaal is. Zijn emissies niet detecteerbaar, dan wordt nader onderzoek verricht in een audiologisch centrum. Zo kan op zeer jonge leeftijd doofheid of slechthorendheid worden gediagnostiseerd en kan ook op jonge leeftijd worden overgegaan tot het aanmeten van hoortoestellen of een cochleair implantaat. Door op jonge leeftijd te starten met gehoorrevalidatie worden de ernstige gevolgen van slechthorendheid voor de taalontwikkeling zo veel mogelijk beperkt.

Gehoorverlies kan vele oorzaken hebben. Bij jonge kinderen leidt bijvoorbeeld vocht in het middenoor regelmatig tot gehoorverlies, wat meestal een tijdelijk probleem is. Omdat het vocht de geleiding van geluid naar het binnenoor bemoeilijkt, wordt hier gesproken van geleidingsverlies. Ook de haarcellen in het binnenoor of de zenuwcellen die contact maken met de haarcellen kunnen zijn aangedaan. Dan wordt gesproken van een perceptief gehoorverlies of binnenoorverlies. Voorbeelden van perceptief gehoorverlies zijn ouderdomsslechthorendheid en lawaaislechthorendheid. Maar er zijn ook diverse vormen van genetische aandoeningen, die al vanaf de geboorte tot ernstige slechthorendheid leiden. Een perceptief gehoorverlies is blijvend. Het is vooralsnog onbekend hoe het genezen kan worden. Patiënten met een perceptief gehoorverlies zijn daarom aangewezen op gehoorverbetering door een hoorapparaat of cochleair implantaat.

De keuze tussen een hoortoestel en een cochleair implantaat is afhankelijk van de ernst van het gehoorverlies. Bij zeer ernstige gehoorverliezen wordt een cochleair implantaat toegepast. Hierbij wordt een implantaat in het basale deel van het slakkenhuis geplaatst. In de spraakprocessor – die als een hoorapparaat achter het oor wordt gedragen – wordt het microfoonsignaal gecodeerd en als elektrische pulsen rechtstreeks in het slakkenhuis aangeboden. Deze codering

Audiologie

Audiologie is de wetenschap van het gehoor. De Nederlandse audiologische centra zijn de expertisecentra waar patiënten met problemen op het gebied van horen, spraak en taal worden geholpen (www.fenac.nl). De klinisch fysicus-audioloog is hoofdbehandelaar van het team dat bij deze patiënten diagnostiek verricht en revalidatie biedt.

is gebaseerd op de Fourierdecompositie zoals normaal gesproken gebeurt door het basilair membraan: een array van contactpunten op de elektrode genereert elektrische pulsen op verschillende tonotopisch bepaalde plaatsen in het slakkenhuis. Met deze prachtige vorm van moderne medische techniek kunnen de meeste volwassen patiënten weer heel redelijk een gesprek voeren. Doof geboren kinderen krijgen hierdoor in veel gevallen de mogelijkheid een normale spraak- en taalontwikkeling door te maken.

Tinnitus

Een veelvoorkomende klacht is oorsuizen oftewel tinnitus [5]. Het lijkt zo te zijn dat elke vorm van gehoorschade kan leiden tot tinnitus, alhoewel lang niet iedereen met gehoorverlies ook tinnitus krijgt. Tinnitus correspondeert niet met de eerder genoemde otoakoestische emissies. Er wordt verondersteld dat tinnitus ontstaat door een reactie in de hersenen op gehoorverlies. Recent onderzoek met behulp van functionele MRI toont dat bij mensen met tinnitus het auditieve systeem in de hersenen inderdaad afwijkt van dat bij mensen zonder tinnitus [6]. Proefdieronderzoek toont aan dat bij geïnduceerde gehoorschade de spontane neurale activiteit in auditieve hersengebieden omhoog gaat, wat zou kunnen corresponderen met tinnitus. Hier bestaat een parallel met fantoompijn: het missen van een vinger kan leiden tot jeuk of pijn; het missen van bepaalde geluidsfrequentie kan leiden tot een fantoomgeluid. Tinnitus komt ook veelvuldig voor onder musici, bij wie door lawaaitrauma geïnduceerd gehoorverlies een beroepsziekte is.

Tot slot

Het oor is een orgaan dat verwondert wekt. Het combineert een grote gevoeligheid met een groot frequentiebereik, een groot dynamisch bereik

en een groot discriminerend vermogen. Hierbij speelt de mechanica van het basilair membraan een grote rol, inclusief de actieve geluidsversterking waar de sensorische haarcellen toe in staat zijn. Als de functie van de haarcellen verstoord raakt, kan het gehoor worden verbeterd met hoortoestellen en soms een cochleair implantaat. Dit kan enorme winst opleveren voor de gebruiker, maar kan de fijnzinnige functie van het normaal functionerende gehoororgaan niet geheel terugbrengen.

Referenties

- 1 H. Duifhuis, *Cochlear Mechanics*. Boston, MA: Springer US. (2012).
- 2 D. D. Greenwood, A cochlear frequency-position function for several species – 29 years later, *Journal of the Acoustical Society of America*, 87 (6): 2592–2605 (1990).
- 3 T. Gold, *Hearing. II. The Physical Basis of the Action of the Cochlea. Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 135 (881), 492–498 (1948).
- 4 G. A. Manley en P. van Dijk, Frequency selectivity of the human cochlea: Suppression tuning of spontaneous otoacoustic emissions. *Hearing Research*, 336, 53–62 (2016).
- 5 J. J. Eggermont en L.E. Roberts, *The Neuroscience of Tinnitus: Understanding Abnormal and Normal Auditory Perception*. *Frontiers in Systems Neuroscience*, 6 (2012).
- 6 K. Boyen, E. de Kleine, P. van Dijk en D.R.M. Langers, Tinnitus-related dissociation between cortical and subcortical neural activity in humans with mild to moderate sensorineural hearing loss, *Hear. Res.* 312, 48–59 (2014).